



# โลหะ

## (Metals)

### IV

ปัจจุบันบท

"สำหรับผู้ที่สนใจงานด้านเหล็ก และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก"

อลุมเนียม ทองแดง

ทองเหลือง ไทเทเนียม

แมกนีเซียม ทอง

ฯลฯ

T.M.E.



## คำนำ

นี่เป็นเล่มที่ 4 เป็นภาคสุดท้ายของเรื่องโลหะที่ผมได้เขียนและเรียบเรียงแล้ว หากมีออกมาอีก เนื้อหาจะเป็นเชิงลึกซึ้งกว่านี้ครับ (ยังมีเรื่องโลหะเชิงลึกที่จะเขียนอีกหลายเล่มครับ แต่ยังมีอีกนานเลย)

ในเล่มนี้ จะกล่าวถึงเนื้อหาของโลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็กครับ อาทิเช่น อลูมิเนียม, แมกนีเซียม, ทองแดง, ทอง ฯลฯ

ลองติดตามผลงานดูนะครับ ตีชมกันได้ละ มีคำถามอะไรก็ถามได้ ถ้ารู้ก็จะตอบให้ครับ

ฝันว่าอยากเห็นประเทศเป็นเจ้าของเทคโนโลยี เป็นประเทศที่พัฒนาแล้ว ควบคู่กับการพัฒนาทางด้านจิตใจ และมีศีลธรรมที่ดี เมืองไทยจะเป็นประเทศที่น่าอยู่มาก

จะขอเป็นส่วนหนึ่ง ในการพัฒนาประเทศอันเป็นที่รักนี้

I have a dream.  
ผู้เขียน และเรียบเรียง  
T.M.E.

## สารบัญ

### ภาคที่ 4 โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| บทที่ 20 กระบวนการโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก.....                        | 8  |
| 20.1 บทนำเข้าสู่โลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก.....                     | 9  |
| 20.2 กระบวนการขั้นตอนพื้นฐานที่ใช้ในโลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก..... | 11 |
| 20.3 โครงสร้างอะตอมในโลหะ.....                                   | 13 |
| 20.4 การผสม.....                                                 | 21 |
| 20.5 งานขึ้นรูปเย็น.....                                         | 24 |
| 20.6 การแข็งตัวอย่างฉับพลัน.....                                 | 36 |
| 20.7 เฟสไดอะแกรม.....                                            | 41 |
| 20.8 อธิบายเฟสโลหะผสมในการทำโลหะให้แข็งแบบฉับพลัน.....           | 42 |
| บทที่ 21 อลูมิเนียม และอลูมิเนียมผสม.....                        | 49 |
| 21.1 บทนำเข้าสู่ความรู้เรื่องอลูมิเนียม.....                     | 49 |
| 21.2 การผลิตอลูมิเนียม.....                                      | 51 |
| 21.3 ประเภทของอลูมิเนียม และอลูมิเนียมผสม.....                   | 61 |
| 21.4 การใช้ประโยชน์ของอลูมิเนียม.....                            | 65 |
| 21.5 การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของอลูมิเนียม.....                   | 74 |
| บทที่ 22 ทองแดง, ทองสัมฤทธิ์ และทองเหลือง.....                   | 86 |
| 22.1 การผลิตทองแดง.....                                          | 91 |
| 22.2 การกำหนดทองแดง และทองแดงผสม.....                            | 96 |

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 22.3 การเปลี่ยนคุณสมบัติของทองแดง.....                      | 97  |
| 22.4 การขึ้นรูปเย็น.....                                    | 107 |
| 22.5 การชุบแข็งจับพลาสมา.....                               | 111 |
| บทที่ 23 แมกนีเซียม, สังกะสี, ดีบุก และโลหะพิเศษอื่น ๆ..... | 116 |
| 23.1 แมกนีเซียมเบื้องต้น.....                               | 117 |
| 23.2 การใช้แมกนีเซียมสำหรับทางการค้า.....                   | 119 |
| 23.3 ความแข็งแรงของแมกนีเซียม.....                          | 126 |
| 23.4 การใช้แมกนีเซียมอย่างปลอดภัย.....                      | 129 |
| 23.5 สังกะสี.....                                           | 132 |
| 23.6 การทำกัลป์วาไนซ์.....                                  | 134 |
| 23.7 งานหล่อสังกะสีลงในแม่พิมพ์.....                        | 122 |
| 23.8 ดีบุก.....                                             | 143 |
| 23.9 การเชื่อมเป็นลูกคลื่น.....                             | 147 |
| 23.10 นิกเกิล และนิกเกิลผสม.....                            | 151 |
| 23.11 ไทเทเนียม.....                                        | 157 |
| 23.12 ทองคำ.....                                            | 164 |
| 23.13 การประสมระหว่างโลหะ.....                              | 170 |



## เกริ่นนำ

ก่อนที่จะเข้าไปศึกษาเรียนรู้ในหนังสือ เล่มที่ 4 นี้ เรามาดูภาพรวมของหนังสือเล่มนี้ ในหนังสือเล่มนี้จะมีทั้งหมด บท ดังนี้

### ภาคที่ 4 โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก

- กระบวนการโลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก กล่าวถึงกรรมวิธีเบื้องต้นของโลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก พิจารณาความแตกต่างโครงสร้างของอะตอม ผลกระทบที่เกิดจากการผสมกันของธาตุ การพิจารณาเฟสไดอะแกรมอธิบายโครงสร้าง
- อลูมิเนียม กล่าวถึงคุณสมบัติของอลูมิเนียม และอลูมิเนียมผสม, อธิบายถึงการทำอลูมิเนียมให้บริสุทธิ์, อธิบายถึงวิธีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอลูมิเนียม



รูปชิ้นส่วนเครื่องกลที่เป็นอลูมิเนียม

- ทองแดง กล่าวถึงคุณสมบัติของทองแดง และทองแดงผสม, การทำทองแดงให้บริสุทธิ์, การใช้งานของทองสัมฤทธิ์ และทองเหลือง



รูปลวดที่ทำมาจากทองแดง

- โลหะที่ไม่ใช่เหล็กอื่น ๆ เช่นแมกนีเซียม, สังกะสี, ดีบุก ฯลฯ



รูปกระทะล้อรถยนต์ที่เป็นแมกนีเซียมผสม

- ฯลฯ



# ภาค 4 โลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก

## บทที่ 20 กระบวนการโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Processing nonferrous metals)

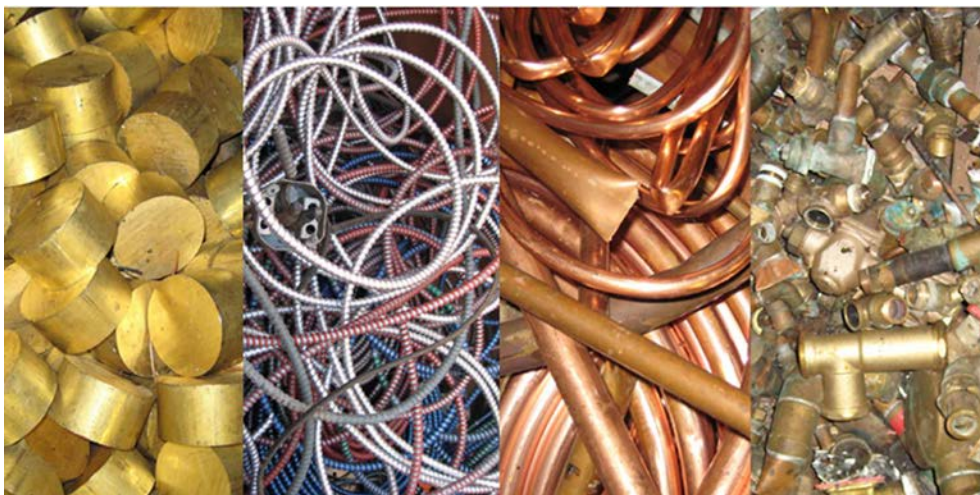


รูปสร้างเครื่องบิน

ที่มา: <http://thevaliens.files.wordpress.com>

การนำศาสตร์ทางโลหะวิทยาไปใช้ประโยชน์ ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญต่อการออกแบบเครื่องกล ยกตัวอย่างเช่นการสร้างเครื่องบิน จะต้องเลือกโลหะที่มีความเบาที่สุด เพื่อลด

น้ำหนักของเครื่องบิน เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ไทเทเนียม ฯลฯ เหล่านี้เป็นโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ซึ่งต้องมีความแข็งแรงที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน



รูปตัวอย่างโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก

ที่มา: <http://www.atscrapmetalrecycling.com.au>

## 20.1 บทนำเข้าสู่โลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก

**เหล็ก (Iron)** และ **เหล็กกล้า (Steel)** มีคุณสมบัติทางกลเพื่อที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เหล็กกล้าถูกผลิตขึ้นมาจากเหล็ก โดยการผสมเหล็กกับธาตุเจืออื่น ๆ ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาให้มีความแตกต่างกันได้ การพัฒนาทางวิทยาศาสตร์ของโลหะที่ใช้เหล็กเป็นส่วนผสมหลักนั้นจึงเป็นหลักสำคัญของหนังสือเล่มนี้

ถึงแม้ว่าเหล็กกล้า และเหล็กจะมีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง แต่ยังมีวัสดุอีกอย่างหนึ่งที่ใช้งานได้อย่างมากมายไม่แพ้กันก็คือ **โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Nonferrous metals)** และ **โลหะผสม (Alloys)**



เราเรียกรวม ๆ กันว่า โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ในการศึกษา โลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก เป็นการศึกษาโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นส่วนผสมหลัก ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง, อลูมิเนียม และ ไทเทเนียม สิ่งทีกล่าวนานี้มีการใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง



รูปสร้างเครื่องบิน

ที่มา: <http://static5.businessinsider.com>

ลองคิดเล่น ๆ ว่าถ้าเครื่องบินถูกสร้างมาจากเหล็กทั้งลำจะเกิดอะไรขึ้น?

ผลที่เกิดขึ้นก็คือ มันจะไม่สามารถบินขึ้นได้เลย หรือถ้าขึ้น จะต้องใช้กำลังงานที่ใช้ในการบินขึ้นอย่างมหาศาล ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่ามันมีน้ำหนักมากเกินไป ทำให้บินไม่ค่อยขึ้น

ในการใช้วัสดุที่ประกอบกันเป็นเครื่องบินต้องใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา และแข็งแรง ซึ่งวัสดุที่เบา และมีความแข็งแรง

ไปด้วย ก็จะได้จากวัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก และโลหะผสม ซึ่งเราจะได้ศึกษากันในภาคนี้

การศึกษากระบวนการของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ส่วนมากจะคล้ายคลึงกันกับการศึกษา กระบวนการทางโลหะวิทยาที่เป็นเหล็ก

ในบทนี้จะนำไปสู่วิธีการศึกษาวัสดุที่นำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย ได้แก่ อลูมิเนียม, ทองแดง, แมกนีเซียม และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กอื่น ๆ



รูปตัวอย่างโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก

ที่มา: <http://anzmetals.co.za>

## 20.2 กระบวนการขั้นตอนพื้นฐานที่ใช้ในโลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก

โลหะที่บริสุทธิ์จริง ๆ ในธรรมชาติที่ขุดขึ้นมา แล้วพบว่ามันมีความแข็งแรง และทนทานนำมาใช้งานได้เลยนั้น หาได้น้อยมาก จะต้องนำมันมาปรับสภาพทางความร้อน เติมนสารเจือปนอื่น ๆ ก่อน เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ ให้เกิดความทนทาน และความแข็งแรงในโลหะ



รูปมิดกึ่ง

ที่มา: <http://cdn.instructables.com>

ตัวอย่างมิดกึ่งเหล็ก ถ้ามันทำมาจากโลหะบริสุทธิ์ และถูกนำไปใช้งานกึ่งเหล็ก มันจะทื่ออย่างรวดเร็ว หลังใช้งานได้ไม่นาน จำเป็นต้องนำกลับไปลับให้คมใหม่อยู่บ่อย ๆ

อาจจะต้องนำความรู้ในบทแรก ๆ มาพิจารณาศึกษาอีกครั้ง เพื่อที่จะนำความรู้ในตอนต้น มาประยุกต์ใช้ในโลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก

เช่นกล่าวถึง การปรับสภาพทางความร้อน เพื่อการปรับปรุงในด้านความแข็ง และความแข็งแรงของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก สิ่งที่จะต้องนำมาทบทวนใหม่ในบทนี้มีอยู่ 3 กระบวนการขั้นพื้นฐาน ได้แก่

- การผสม (Alloying)
- งานขึ้นรูปเย็น และการอบอ่อน (Cold working & Annealing)

## o ทำความแข็งทันที หรือการชุบแข็ง

ในแต่ละวิธีการที่จะกล่าวในบทนี้ ที่ถูกนำไปใช้ในโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก จะมีความคล้ายคลึงกันกับ วิธีการที่ใช้ในเหล็กกล้า นอกจากนี้ยังครอบคลุมเนื้อหาไปถึง **เหล็กกล้าผสม (Alloy steel)** และ **เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)** อีกด้วย

โลหะวิทยาที่ไม่ใช่เหล็ก หลังจากนำมาปรับปรุงตัววัสดุ ที่ให้มีความสามารถด้านความแข็ง และความแข็งแรงแล้ว ยังมีความสามารถในการยืดหยุ่นตัว และการความสามารถด้านการคงรูปร่างได้ดี อีกทั้งยังมีคุณสมบัติพิเศษอื่น ๆ ที่จะพบในโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น น้ำหนักที่เบากว่า, **ความทนทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance)** และ **คุณสมบัติในการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)**

โครงสร้างอะตอมของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางกล ก็มีรูปแบบแตกต่างกัน สามารถดูรายละเอียดได้ในบทที่ว่าด้วยโครงสร้างผลึก

เมื่อชิ้นงานถูกปรับสภาพทางความร้อน รูปแบบโครงสร้างอะตอมก็มีการปรับเปลี่ยนทางกายภาพไปด้วย ซึ่งในโครงสร้างอะตอมของโลหะที่ไม่ใช่เหล็กจะได้กล่าวอธิบายเพิ่มเติมต่อไป

## 20.3 โครงสร้างอะตอมในโลหะ

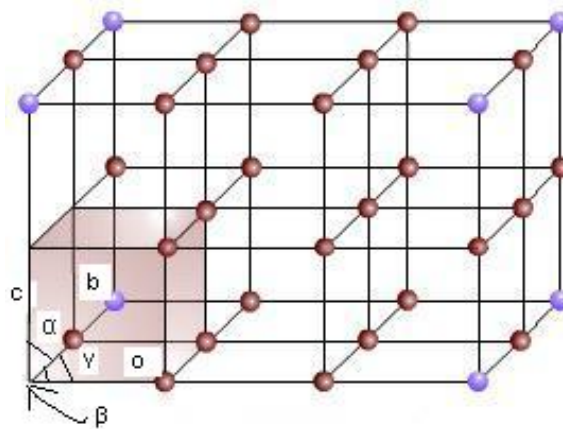
ในเนื้อโลหะ ประกอบไปด้วยอะตอมจำนวนมาก ที่เป็นรูปแบบโครงสร้างต่าง ๆ ก่อตัวภายในโลหะ ที่เรียกว่า **โครงสร้างผลึก (Crystal structure)** ในแต่ละอะตอมจะจัดเรียง



ตัวกันตามคุณสมบัติของโลหะ การจัดเรียงตัวเป็นหน่วยที่เรียกกันว่า **หน่วยเซลล์ (Unit cells)**

ซึ่งโครงสร้างผลึกก็เป็นส่วนหนึ่งในหน่วยเซลล์ ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ว่าด้วยโครงสร้างผลึก การจัดตัวของอะตอมจะมีพลังงานเคมีเล็ก ๆ เกิดขึ้น ถ้าชิ้นงานถูกนำมาหล่อ หรือทำให้แข็งตัวอย่างช้า ๆ

โครงสร้างผลึกที่ได้จะมีหลายรูปแบบ โลหะบริสุทธิ์จะมีโครงสร้างที่คล้ายกันประกอบรวมกันทั้งหมด โครงสร้างผลึกจะมีซ้ำ ๆ กันในทุกทิศทุกทาง ดูที่รูปด้านล่าง



รูปกลุ่มของหน่วยเซลล์ ที่ประกอบขึ้นมาจากโครงสร้างผลึก จะมีแต่อะตอมอยู่ที่ตามมมเท่านั้นที่แสดงอย่างชัดเจน

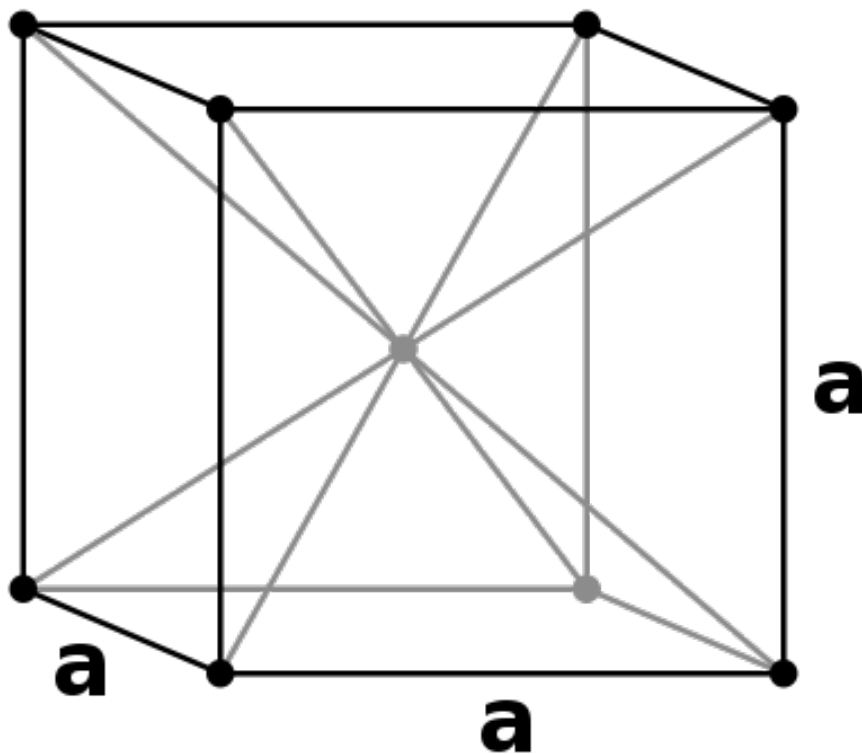
ที่มา: <http://www.tutorhelpdesk.com>

การจัดเรียงตัวอะตอมของธาตุทั้งหมดในโลกนี้มีจำนวนมากมาย แต่เราจะกล่าวเฉพาะในงานโลหะวิทยาเท่านั้น การจัดเรียงตัวที่เกิดขึ้นในโลหะ จะมีดังนี้ (รายละเอียดอยู่ในบทโครงสร้างผลึก ตอนนี้แค่กล่าวคร่าว ๆ เพื่อโยงเรื่องไปกับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กครับ)

- อะตอมอยู่ตามมุมสี่เหลี่ยมลูกบาศก์จัตุรัส และที่ตรงกลาง หรือเรียกว่า บีซีซี (Body-Centered Cubic: B.C.C)

- อะตอมอยู่ตามมุมสี่เหลี่ยมลูกบาศก์จัตุรัส และที่ผิวหน้าแต่ละด้าน หรือเรียกว่า เอฟซีซี (Face-Centered Cubic: F.C.C)
- อะตอมอยู่แบบลูกบาศก์หกเหลี่ยมชิดกันหนาแน่น หรือเรียกว่า ซีพีเฮกซ (Close-Packed Hexagonal: C.P.H)
- อะตอมอยู่ตามมุมสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ไม่จัตุรัส (ผืนผ้า) และที่ตรงกลาง หรือเรียกว่า บีซีที (Body-Centered Tetragonal: B.C.T)

โครงสร้างเหล่านี้มักจะพบในวัสดุที่เป็นโลหะ ทั้งที่เป็นเหล็กและไม่ใช่อเหล็ก โดยแต่ละรูปแบบจะได้อธิบายต่อไป



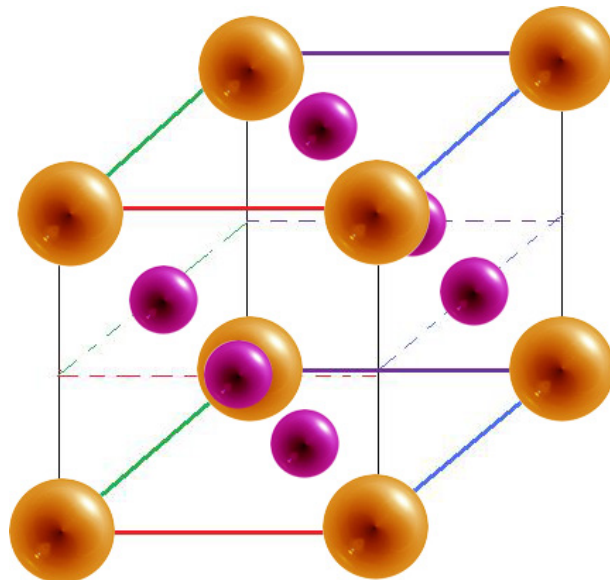
[รูปการจัดเรียงอะตอมบีบีซีในหน่วยเซลล์](http://chem.libretexts.org)

ที่มา: <http://chem.libretexts.org>



โครงสร้าง บีซีซี ดูที่รูปด้านบน ปกติจะเกิดขึ้นในเหล็ก  
 โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferritic iron) ที่อุณหภูมิห้อง นอกจาก  
 เหล็กแล้ว โลหะที่ไม่ใช่เหล็กที่มีโครงสร้างนี้ได้แก่ โมลิบดีนัม  
 (Molybdenum), ไนโอเบียม (Niobium), โพแทสเซียม  
 (Potassium), ทังสเตน (Tungsten) และวานาเดียม  
 (Vanadium)

ที่กล่าวมาเหล่านี้ในแต่ละชนิด จะมีโครงสร้างที่เหมือนกัน  
 ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ส่วน ไทเทเนียม (Titanium)  
 ที่อุณหภูมิสูง จะมีโครงสร้างเป็น บีซีซี ด้วย

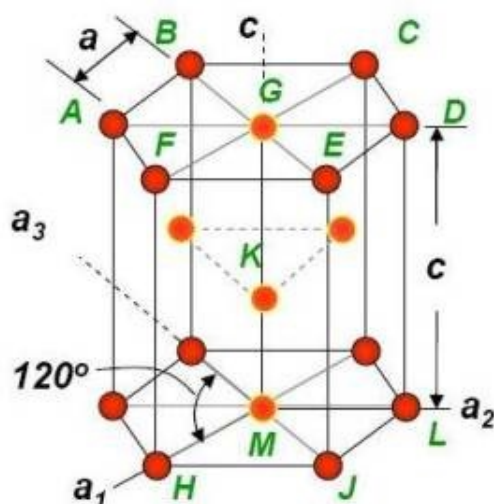


รูปการจัดเรียงอะตอมเอฟซีซีในหน่วยเซลล์

ที่มา: <http://chem.libretexts.org>

โครงสร้าง เอฟซีซี ในรูปที่ด้านบน โดยทั่วไปแล้ว จะ  
 เกิดขึ้นในเหล็กโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenitic iron) ที่มี  
 อุณหภูมิสูง

ส่วนโลหะที่ไม่ใช่เหล็กโครงสร้างนี้ ได้แก่ อลูมิเนียม,  
 ทองแดง, ทอง, เงิน, ตะกั่ว (Lead), นิกเกิล และทองคำขาว  
 (Platinum) ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะมีโครงสร้าง เอฟซีซี



Miller Bravais Indices for CPH Structure

รูปโครงสร้าง ซีพีเฮช เกิดขึ้นในโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น เบริลเลียม ไทเทเนียม และโคบอลต์

ที่มา: <http://practicalmaintenance.net>



รูปเบริลเลียม

ที่มา: <http://www.periodictable.com>

โครงสร้าง ซีพีเฮช ในรูปด้านบน โดยปกติแล้วไม่ใช่เหล็ก ยกตัวอย่าง เช่น **เบริลเลียม (Beryllium)**, **โคบอลต์ (Cobalt)**, แมกนีเซียม และ**สังกะสี (Zinc)** เป็นโครงสร้างนี้ ไทเทเนียม

และไซรโคเนียม (Zirconium) ก็มีโครงสร้าง ซีพีเฮช เช่นกันที่  
อุณหภูมิห้อง



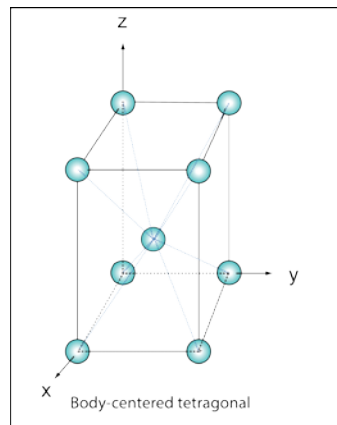
[รูปไซรโคเนียม 1](#)

ที่มา: <http://www.periodictable.com>



[รูปไซรโคเนียม 2](#)

ที่มา: <http://www.periodictable.com>



รูปโครงสร้าง บีซีที มีรูปโครงสร้างผลึกคล้ายกันกับรูปแบบของ บีซีซี

ที่มา: <http://teachingresources.grantadesign.com>

รูปแบบของอะตอมในโครงสร้าง บีซีที ในรูปด้านบน คล้ายกันกับ บีซีซี อย่างไรก็ตาม บีซีทีไม่ใช่ลูกบาศก์ที่สมบูรณ์ ความยาวของมุมแตกต่างกันมากกว่าอีกสองด้าน ดิบก ที่ อุณหภูมิห้องจะมีโครงสร้างแบบ บีซีที

คุณสมบัติทางกลของโครงสร้างอะตอมของโลหะที่ไม่ใช่ เหล็ก ของโครงสร้าง ซีพีเฮช มีความแข็งแรงมาก ซึ่งจะทำให้ การบิดโค้งงอไม่ได้ง่าย ๆ คือมีความแข็งแรงแต่ก็เปราะ แต่มิฉะนั้น คือเมื่อถูกแรงกระแทกแรง ๆ จะเกิดการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ได้ ง่าย ยกตัวอย่าง ล้อรถยนต์ที่ทำมาจากแมกนีเซียมสามารถแตก ได้ ถ้าล้อรถถูกแรงกระแทกอย่างแรง (**แมกนีเซียมก็มีโครงสร้างแบบ ซีพีเฮช**)



รูปล้อแม็ก ที่ทำมาจากแมกนีเซียมผสม

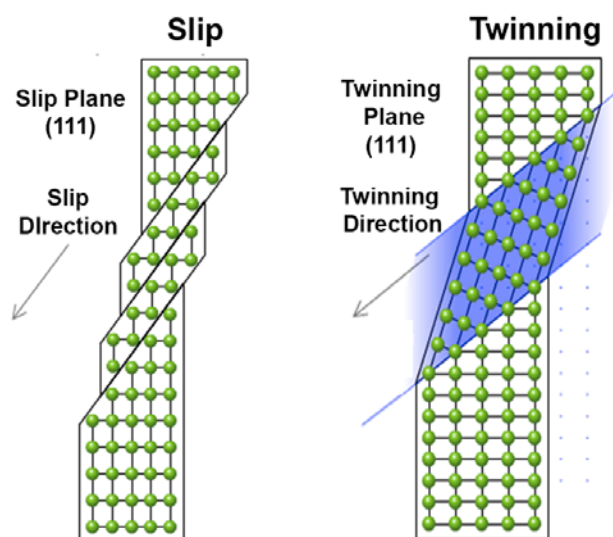
โลหะที่มีโครงสร้าง บีซีซี และเอฟซีซี จะให้ความยืดตัวได้มากกว่าโครงสร้างอื่น ๆ ยกตัวอย่างเช่น แท่งโลหะที่มีโครงสร้าง บีซีซี ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านละ 2 มิลลิเมตร และยาว 15 เซนติเมตร เมื่อป้อนแรงดัดให้โลหะโค้งงอ เมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งโลหะจะงอ และเสียรูปไป เมื่อนำแรงออกแล้วโลหะก็จะไม่คืนตัวกลับสู่สภาพเดิม ก็คือมันเสียรูปไปเลย



รูปตัวอย่างการดัดโลหะโครงสร้างบีซีซี

ที่มา: <http://i.ebayimg.com>

เมื่อโลหะสูญเสียรูปร่างไปแล้ว อะตอมในโครงสร้างผลึกจะสไลด์ออกไปเป็นชั้น ๆ ตลอดแนวที่ถูกทำให้เสียรูป ดังในรูปด้านล่าง



รูปอะตอมจะสไลด์ผ่านระนาบหนึ่ง ๆ ตลอดระนาบที่เลื่อนในระหว่างที่โลหะเกิดการเสียรูป

ที่มา: <http://physics.aps.org>



สามารถอ่านรายละเอียดได้ในบทการพัง และการเสียรูปของโลหะ แรงที่โลหะถูกกระทำให้งอได้ง่าย แรงที่กระทำเป็นแรงไม่มาก ระบายบางหน้าจะเลื่อนไป อะตอมก็จะเกิดการเลื่อนตามไปด้วย (ทำให้ขนาดของอะตอมอาจเกิดการเปลี่ยนแปลง) โดยที่ใช้แรงไม่มาก

จากรูปด้านบนมันเป็นไปไม่ได้ ที่เราจะเห็นการเคลื่อนที่แบบสไลด์ของอะตอม เพราะมันมีขนาดเล็กมาก ๆ คือมันมีจำนวนอะตอมเป็นล้านตัว ดังนั้นเราจึงเห็นได้จากแบบจำลองชิ้นงานตัวอย่าง

## 20.4 การผสม

**การผสม (Alloying)** เป็นการเติมโลหะธาตุ ชนิดหนึ่งหรือมากกว่าสองชนิด ใส่ลงไปในงานที่เป็นชิ้นหลัก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล ให้เป็นไปตามความต้องการ เราเรียกโลหะประเภทนี้ว่า **โลหะผสม (Alloy)**



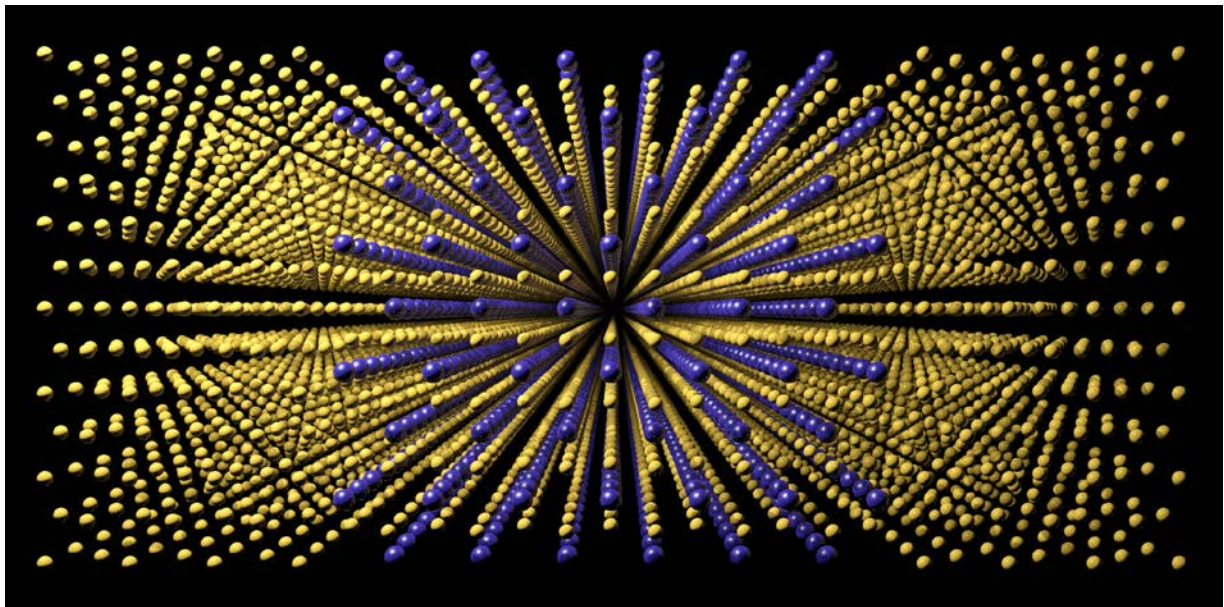
รูปล้อแม็ก เป็นตัวอย่างที่เห็นได้ชัดของโลหะผสม

ที่มา: <http://shreetyres.co.in>

การเติมธาตุเพียงเล็กน้อย ผสมลงไป โลหะแล้ว แต่มันยังคงรักษาโครงสร้างเดิมไว้ โลหะผสมชนิดนี้จะเรียกว่า **โลหะผสมละลายในของแข็ง (Solid solution alloy)** ส่วนผสมจะเป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นใหม่ เช่น เกิดซีเมนไต (Cementite : $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ในเหล็กกล้า

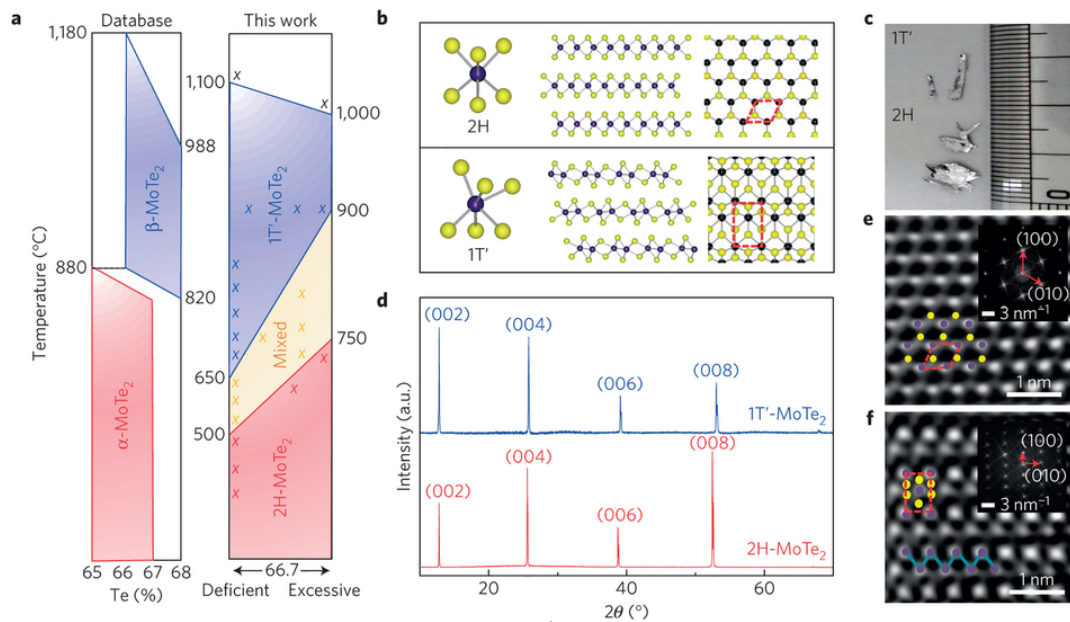
เทคนิคที่ใช้คือ **การผสม (Mixture)** เป็นโลหะผสมที่สามารถละลายลงไป ในของแข็ง และเกิดมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างอะตอมของโลหะ

ถ้าสมมติว่าใส่ธาตุผสมเพียงเล็กน้อย เติมลงไป โลหะที่บริสุทธิ์ ในระหว่างการหลอม และหล่อ อะตอมของธาตุที่ถูกผสมจะไปแทรกซึมเข้าไปในโลหะเดิมเหล่านั้น การผสมทำให้เกิดรูปแบบการจัดตัวของอะตอมใหม่ในโลหะเดิมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอะตอม ซึ่งแสดงในรูปด้านล่าง



รูปการแทนที่อะตอมเกิดขึ้น เมื่อธาตุผสมถูกเติมที่โลหะบริสุทธิ์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

ที่มา: <http://cdn.phys.org>



### รูปการแทนที่ของอะตอม

ที่มา: <http://www.nature.com>

เมื่อขนาดของอะตอมในธาตุผสมมีขนาดใหญ่ พวกมันจะไปแทนที่อะตอมในโครงสร้างเดิม อะตอมของธาตุที่ถูกนำมาผสมที่มีขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของอะตอม

ผลที่ได้จากการผสม จะเป็นแบบการละลายในของแข็ง โครงสร้างผลึกเดิมยังคงอยู่ แต่ชิ้นงานจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อถูกแรงกระทำ วัสดุจะมีความสามารถในการต้านแรงกระทำได้มากขึ้นดีกว่าวัสดุก่อนที่จะผสม อันนี้เป็นผลที่ได้จากการแทนที่ของอะตอมที่ได้มาจากการผสม

ผลที่ได้จากอะตอมโครงสร้างใหม่ที่อยู่รอบ ๆ ตัวโครงสร้าง จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากขนาดของอะตอมที่มีความแตกต่างกัน อะตอมที่ถูกแทนที่จะมีการสไลด์ไปข้าง ๆ ได้ง่าย เพราะฉะนั้นอะตอมที่ได้มาใหม่ ต้องแข็งแรงพอที่ทนทานต่อการสไลด์ ด้วยมีแรงดึงดูดกันภายในอย่างเพียงพอ นอกจากความแข็งแรงที่มีดีกว่าโลหะบริสุทธิ์แล้ว มันยังมีความสามารถในการคงรูปร่างอีกด้วย

วิธีการผสมที่เติมธาตุลงไปในที่กล่าวมาหลัก ๆ นี้อยู่ที่ความแข็งแรงของโลหะผสม เพราะว่ามันเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะ จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า **ความแข็งที่ได้จากสารละลายของแข็ง (Solid solution hardening)** ได้เหมือนกัน

## 20.5 งานขึ้นรูปเย็น

**งานขึ้นรูปเย็น (Cold working)** คือการนำแรงมากระทำซ้ำ ๆ กันเพื่อให้โลหะเสียรูป และโลหะเกิดความแข็งแรงขึ้น เรียกกระบวนการนี้ว่า **การเพิ่มความแข็งแรงในงาน (Work hardening)** ได้กล่าวโดยย่อใน บทเรื่องของการพังและการเสียรูปของโลหะมาแล้ว งานขึ้นรูปเย็น โดยปกติมักใช้กับกระบวนการ และความแข็งแรงในโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก

ในการขึ้นรูปเย็นนั้น โลหะจะมีความแข็งแรงขึ้นได้ ต้องผ่านการทุบ หรือการรีด เทคนิคอยู่ที่ขึ้นงานเล็ก ๆ เช่น ท่อทองแดงบาง ทำโดยการจับด้วยคีม และตีมันด้วยค้อน ดีหลาย ๆ ครั้ง ในการตีแต่ละครั้งรูปร่างจะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไป จนในที่สุดโลหะก็ให้ความแข็งแรงตามที่ต้องการ



รูปการดัดท่อทองแดง

ที่มา: <https://i.ytimg.com>



การกระทำซ้ำ ๆ ของแรง ทำให้โลหะแบนจนโลหะเกิดความแข็งแรง และความแข็งขึ้น จากโลหะยังที่เบา และยืดตัวได้น้อย แล้วนำไปทำการขึ้นรูปเย็นทำให้โครงสร้างอะตอมของโลหะการเปลี่ยนแปลงไปยังรูปแบบที่แข็งแรงขึ้น

อีกทั้งยังทนทานต่อความเค้นได้มากกว่า งานที่ทำให้โลหะแข็ง สามารถทนต่อแรงได้มากกว่าโลหะที่ยังเป็นรูปแบบเดิม งานที่ทำให้โลหะแข็งนี้ถูกกระทำโดยที่ไม่ได้ให้ความร้อนแก่โลหะ กระทำกันในอุณหภูมิห้อง เราจึงเรียกรูปแบบนี้ว่า **งานขึ้นรูปเย็น**

## 20.5.1 งานรีด

**งานรีด (Rolling)** เป็นเทคนิคหนึ่งในงานขึ้นรูปเย็นที่ทำให้โลหะวิ่งผ่านลูกกลิ้ง โดยมีแรงที่ใช้เพื่อรีดให้โลหะจากขนาดเดิม ๆ จนมีขนาดเล็กลงตามขนาดที่ต้องการในขั้นตอนสุดท้าย

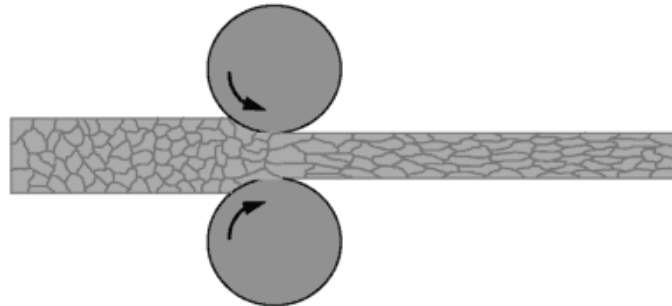


**รูปตัวอย่างเครื่องรีด**

ที่มา: <http://www.akyapak.com.tr>



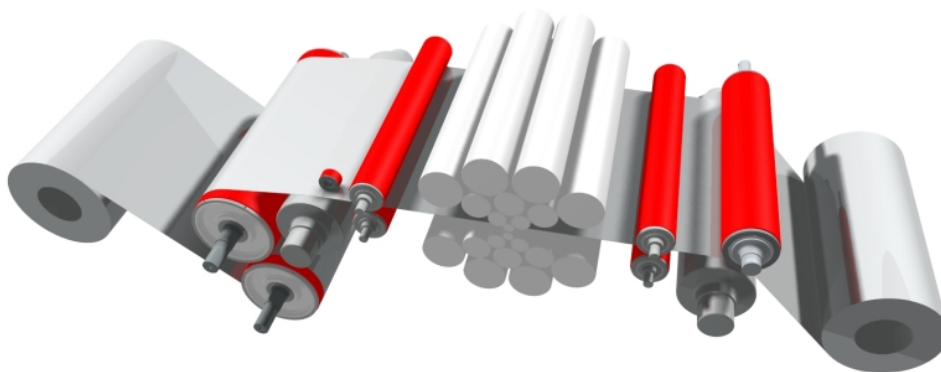
**เครื่องรีด (Rolling mill)** จะมีลูกกลิ้งอยู่สองลูก หรือมากกว่า เพื่อทำการลดขนาดของโลหะแผ่น ผลที่ได้จากการรีดก็คือ โลหะมีความแข็งแรงขึ้น



*Cold work being rolled  
into copper alloy strip.*

รูปตัวอย่างงานรีดเย็นเป็นหนึ่งในงานขึ้นรูปเย็น

ที่มา: <https://qph.ec.quoracdn.net>



รูปการรีดขึ้นรูป

ที่มา: <http://tb.woehler.com>

เมื่อมีแรงกระทำที่โลหะ โลหะจะเกิดการยืดตัว ที่ตัวโลหะสามารถทนทานต่อแรงได้ค่าหนึ่ง ก่อนที่จะยืดตัวเสียรูปออกไป ถ้าใส่แรงมากเกินไปโลหะก็จะเกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องมีการคิดคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์งานขึ้นรูปเย็น เพื่อหาความทนทาน

ของโลหะที่จะไม่ทำให้โลหะเกิดความเสียหายได้ สมการดูได้จากข้างล่างนี้

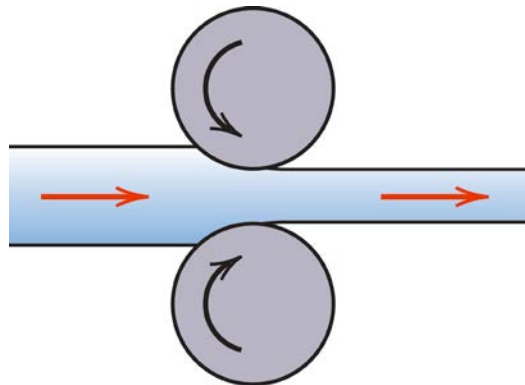
$$\%CW = (t_{\text{orig}} - t_{\text{exit}}) / t_{\text{orig}} \times 100\%$$

กำหนดให้

$\%CW$  = เปอร์เซ็นต์ของงานขึ้นรูปเย็น

$t_{\text{orig}}$  = ความหนาเดิมของแผ่นโลหะ

$t_{\text{exit}}$  = ความหนาใหม่ที่ผ่านการรีดแล้ว



รูปการรีดเพื่อลดความหนาของโลหะแผ่น เพื่อให้ขนาดนั้นเล็กลง

ที่มา: <https://upload.wikimedia.org>

ความหนาเดิมของแผ่นโลหะ และความหนาใหม่ที่ผ่านการรีดแล้วนั้นดูได้จากรูปด้านบน สมมติว่าให้ชิ้นงานก่อนเข้าเครื่องรีด มีความหนา 0.250" และถูกรีดจนลดลงเหลือ 0.150" ดังนั้น เปอร์เซ็นต์ของงานขึ้นรูปเย็นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\%CW = (t_{\text{orig}} - t_{\text{exit}}) / t_{\text{orig}} \times 100\%$$

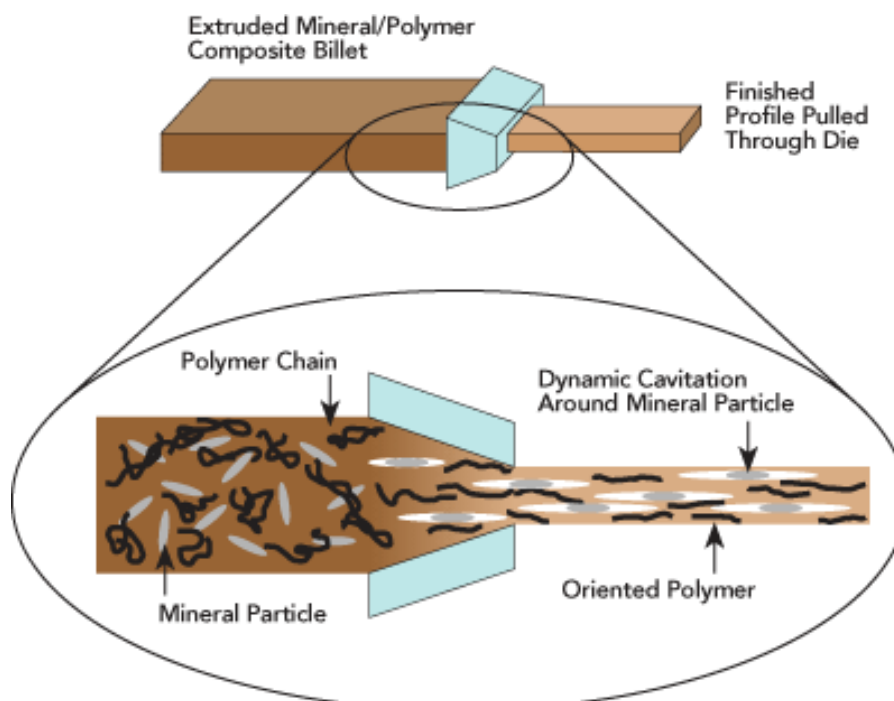
$$= (0.250'' - 0.150'') / 0.250'' \times 100\%$$

$$= 40 \%$$

ดังนั้น ความหนาของแผ่นโลหะมีค่าลดลง 40% หลังผ่านการรีดหนึ่งครั้ง โดยทั่วไปแล้ว โลหะส่วนใหญ่จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ของการรีดตัวได้ไม่เกิน 75% ถ้ามีค่ามากกว่านี้โลหะจะสูญเสียค่าความยืดตัว และอาจเกิดรอยร้าวได้

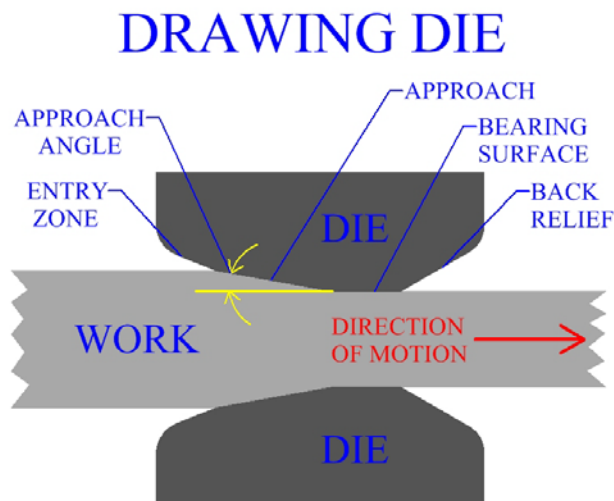
## 20.5.2 การดึง และการอัดขึ้นรูป

**การดึง และการอัดขึ้นรูป (Drawing & Extrusion)** ผลที่ได้ จะมีความคล้ายคลึงกัน ผลที่ได้ของงานก็คือการลดขนาดพื้นที่ของชิ้นงานตามแนวยาว ในการดึงขึ้นรูป เป็นวิธีการสร้างรูปร่างให้กับโลหะโดยการดึงผ่าน **ตัวตายแม่พิมพ์ (Die)** ผลที่ได้ออกมาชิ้นงานจะมีขนาดเล็ก



รูปการดึงขึ้นรูป

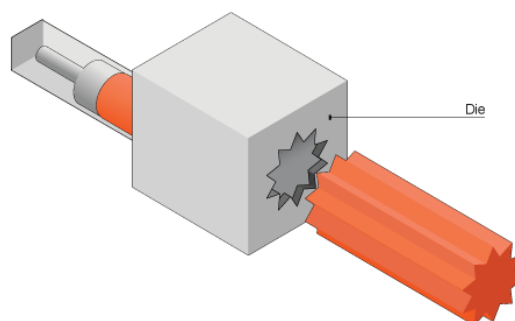
ที่มา: <http://www.eovationsllc.com>



### รูปการดึงขึ้นรูป 2

ที่มา: <http://thelibraryofmanufacturing.com>

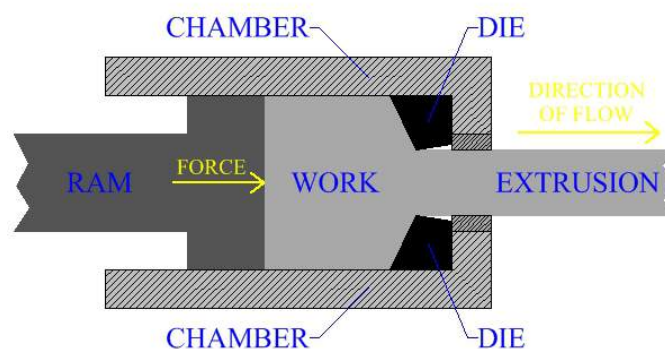
ส่วนการอัดขึ้นรูป ขนาดของเหล็กกล้าลดลงในช่วงสุดท้าย  
เมื่อมีแรงกระทำผ่าน **เครื่องกระทุ้ง (Ram)** ในการอัดขึ้นรูปนั้น  
โลหะสามารถทำในสภาวะร้อน หรือเย็นก็ได้



### รูปการอัดขึ้นรูป

ที่มา: <http://thelibraryofmanufacturing.com>

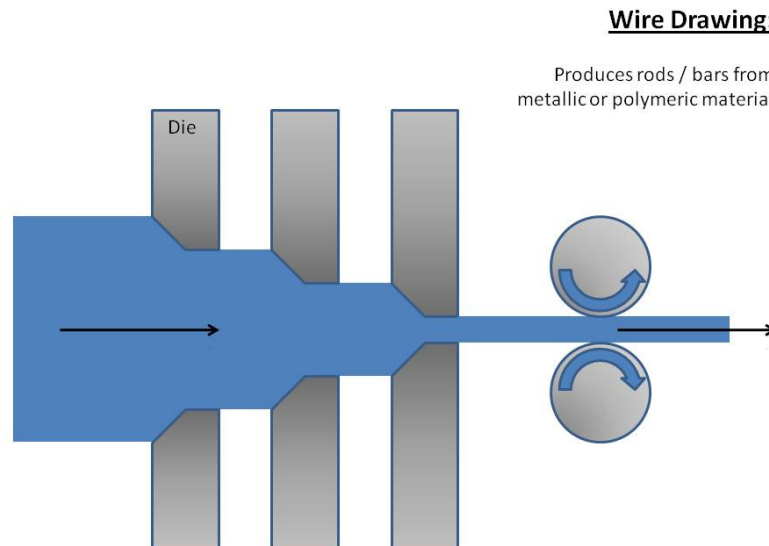
## DIRECT EXTRUSION



### รูปการอัดขึ้นรูป 2

ที่มา: <http://thelibraryofmanufacturing.com>

โลหะที่เป็นแท่ง, ท่อ และลวด โดยทั่วไปจะผ่านการวิธีการดึงขึ้นรูป การดึงขึ้นรูป ได้ทำการลดขนาดเดิมลง จนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่าเดิม แสดงในรูปด้านล่าง



รูปการดึงขึ้นรูป โลหะมีความหนาลดลง เมื่อมันวิ่งผ่านด้าย

ที่มา: <https://c1.staticflickr.com>



รูปเครื่องดึงขึ้นรูป

ที่มา: <https://i.ytimg.com>

ในการขึ้นรูปด้วยการดึง งานขึ้นรูปเย็นสามารถคำนวณหาขนาดเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นได้โดยการหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน



ทั้งขนาดเดิม และขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปดูที่สมการข้างล่างที่นำไปใช้คิดในงานดัดขึ้นรูป

$$A_{\text{orig}} = (\pi \times d_{\text{orig}}^2) / 4$$

$$A_{\text{exit}} = (\pi \times d_{\text{exit}}^2) / 4$$

$$\%CW = (A_{\text{orig}} - A_{\text{exit}}) / A_{\text{orig}} \times 100\%$$

กำหนดให้

$d_{\text{orig}}$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดิม

$d_{\text{exit}}$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหม่

$A_{\text{orig}}$  = พื้นที่หน้าตัดเดิม

$A_{\text{exit}}$  = พื้นที่หน้าตัดใหม่

$\pi = 3.14159$

ตัวอย่าง ชิ้นงานของโลหะ ถูกดัดขึ้นรูปจากขนาดเดิม 0.350" ลดเหลือขนาดไปเป็น 0.325" เปอร์เซ็นตงานขึ้นรูปเย็นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 A_{\text{orig}} &= (\pi \times d_{\text{orig}}^2) / 4 \\
 &= (\pi \times (0.350'')^2) / 4 \\
 &= 0.9621 \text{ in}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{\text{exit}} &= (\pi \times d_{\text{exit}}^2) / 4 \\
 &= (\pi \times (0.325'')^2) / 4 \\
 &= 0.08296 \text{ in}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \%CW &= (A_{\text{orig}} - A_{\text{exit}}) / A_{\text{orig}} \times 100\% \\
 &= ((0.9621 \text{ in}^2) - (0.08296 \text{ in}^2)) / (0.9621 \text{ in}^2) \times 100\% \\
 &= 13.8\%
 \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์ของงานขึ้นรูปเย็น ในการขึ้นรูปดิ่งแท่งโลหะ ก็คือ 13.8%

เมื่อโลหะถูกอัดขึ้นรูปกับชิ้นงานร้อน ในการคำนวณ เปอร์เซ็นต์การลดลงจะคำนวณด้วยวิธีเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่การเรียกชื่อ กล่าวคือ การอัดขึ้นรูปกับชิ้นงานร้อน เราเรียกว่า **เปอร์เซ็นต์งานร้อน (Percent hot work)** แทนที่ในการเรียกเปอร์เซ็นต์งานขึ้นรูปเย็น

### 20.5.3 การอบอ่อน (Annealing) โลหะ หลังจากการขึ้นรูปเย็น

ในการรีดงานโดยวิธีงานขึ้นรูปเย็น เพื่อลดขนาดของชิ้นงาน ไม่ได้มีเพียงวิธีเดียวที่ทำได้ แต่มันยังมีวิธีการอื่น ๆ อีกหลายวิธี ที่ช่วยเพื่อลดขนาดความหนา

ในการลดขนาดชิ้นงานอลูมิเนียมแท่งที่ถูกรีดด้วยความร้อนจากความหนา 6.35 mm (0.250") ลดลงเหลือ 1 mm (0.040") หรือน้อยกว่านั้น เพียงครั้งเดียวสามารถทำได้ แต่ถ้าบางมากเกินไปอาจเสี่ยงต่อ การเกิดรอยแตกเล็ก ๆ ที่เกิดจากการโค้งงอ

ขั้นสุดท้ายของงานขึ้นรูปเย็น ก็คือการนำไปอบอ่อน เพื่อให้โลหะมีความยืดหยุ่นตัว ลดความเครียดภายในชิ้นงาน เกิดความอ่อนนุ่ม การอบอ่อนได้อธิบายไว้แล้วใน บทว่าด้วยการอบอ่อน และการอบปกติ



[รูปการอบอ่อนอลูมิเนียม](https://www.secwarwick.com)

ที่มา: <https://www.secwarwick.com>

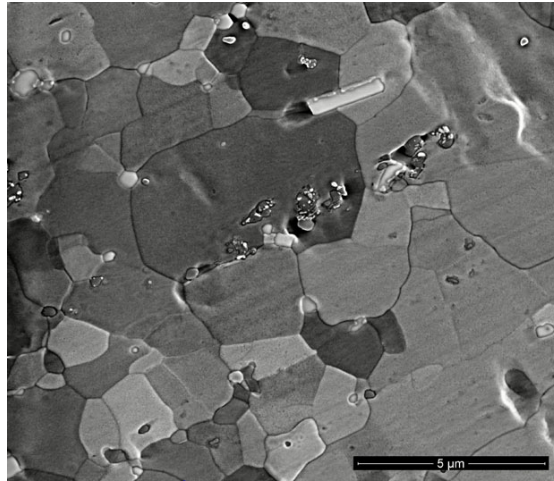
ขั้นตอนกระบวนการอบอ่อน โลหะจะนำไปสู่เตาอบ และถูกให้ความร้อน อุณหภูมิจะสูงตามชนิดวัสดุ แต่จะไม่สูงเกินกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้น ให้ความร้อนในเวลาหนึ่ง และปล่อยให้เย็นตัวอยู่ในเตาอบจนกระทั่งชิ้นงานมีเย็นตัวอยู่ที่อุณหภูมิห้อง

เวลาที่ใช้ในการอบอ่อน จะเปลี่ยนแปลงไปพร้อมกับอุณหภูมิที่ใช้อบอ่อน เป็นสัดส่วนกัน การให้ความร้อน และทำให้เย็นก็ขึ้นอยู่กับเฉพาะแต่ละวัสดุ ระยะเวลาในการทำงานอาจเป็นหนึ่งชั่วโมง หรือยาวนานกว่านั้นในเตาอบ

เมื่อให้อุณหภูมิสูงใกล้จุดหลอมเหลวมากเท่าใด เวลาที่ใช้ในการอบอ่อนจะสั้นกว่ามาก ยกตัวอย่างทองแดงผสมให้ความร้อนในเตาอบ ที่อุณหภูมิประมาณ  $93.3^{\circ}\text{C}$  ( $200^{\circ}\text{F}$ ) ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว การอบอ่อนใช้เวลาน้อยกว่า 2 นาที

โลหะที่ผ่านงานขึ้นรูปเย็น และการอบอ่อน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะตอมในโลหะขึ้น ก่อนหน้าที่จะเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปเย็น โลหะก็จะมีผลึกที่สมบูรณ์รูปแบบหนึ่ง

เมื่อผ่านการขึ้นรูปเย็น แรงที่ใช้จะทำให้เกิดการไถลเกิดขึ้นในระนาบวัสดุทันที ระบายจะไถลติดกันกับระนาบอื่น เมื่อเสร็จกระบวนการขึ้นรูปเย็น อะตอมจะกลับคืนไปสู่รูปแบบเดิม โครงสร้างก็จะเป็นผลึกที่สมบูรณ์เหมือนเดิม

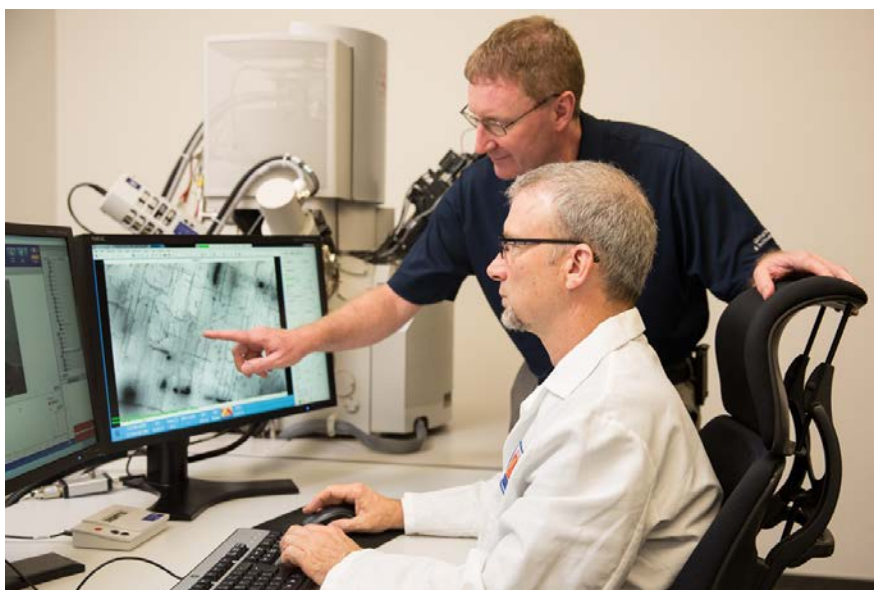


รูปอลูมิเนียมที่ถูกส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

ที่มา: <http://the-science-of-aluminium-foil.weebly.com>

วัสดุที่ผ่านการอบอ่อนแล้ว พื้นที่ของผลึกที่เรียกว่า เกรน และขอบเขตของเกรนนั้น เราจะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน โดยการมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่อัตราขยาย 100 เท่า งานขึ้นรูปเย็นทำให้วัสดุเกิดการขยายยัด และมีการโค้งงอของผลึก

หลังจากการอบอ่อนแล้ว จะเกิดรูปแบบเกรนใหม่ และโครงสร้างที่ได้ จะเหมือนรูปแบบเดิม โครงสร้างเกรนจะมีความสมบูรณ์



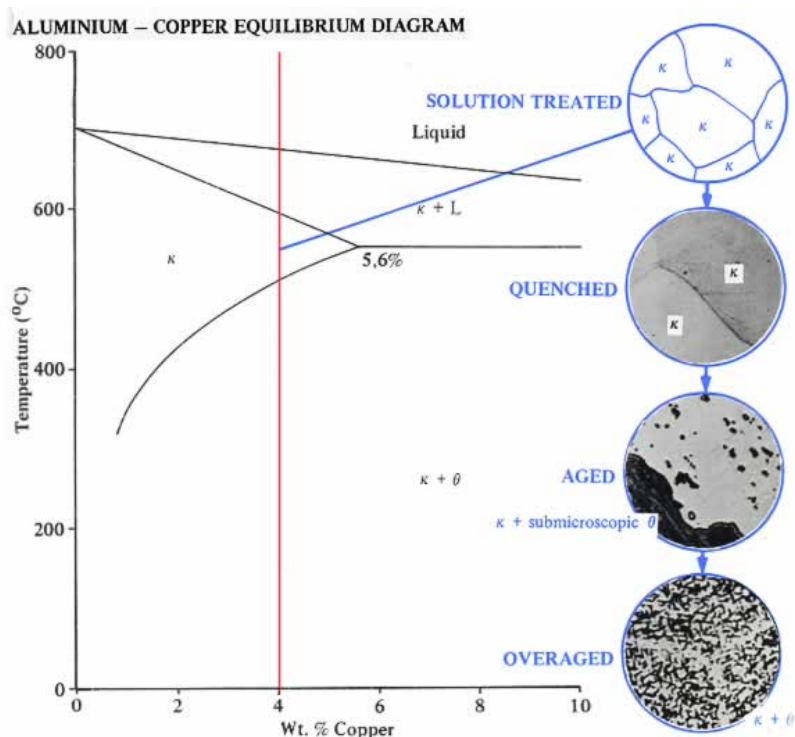
รูปการตรวจดูโครงสร้างอลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ที่มา: <http://2gjjon1sdeu33dnmvp1qwsdx.wpengine.netdna-cdn.com>



## 20.6 การแข็งตัวอย่างจับพลัน

การแข็งตัวอย่างจับพลัน (Precipitation hardening)  
 (เป็นคำที่เรียกกับโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ถ้าเป็นเหล็กเราจะเรียกว่า การชุบแข็ง)  
 เป็นกระบวนการปรับสภาพทางความร้อน เพื่อให้โลหะผสมเกิด  
 ความแข็งแกร่งขึ้น เนื่องจาก **เฟส (Phases)** (ขอบเขตของผลึก  
 ในโลหะ) เกิดรูปแบบขึ้นใหม่ ทันทีที่อุณหภูมิ และอัตราความเย็น  
 เกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปการแข็งตัวอย่างจับพลันของอลูมิเนียม-ทองแดง

ที่มา: <http://me.aut.ac.ir>

โลหะที่ถูกเติมธาตุเข้าไปช่วงที่อุณหภูมิสูง ธาตุจะหลอมละลายรวมตัวกับโลหะ จนเป็นโลหะผสม จากนั้นก็ทำการชุบแข็งอย่างรวดเร็วจะเกิดเฟสใหม่ในเวลาไม่กี่นาที หรือบางชนิดอาจเป็นสัปดาห์

เฟสใหม่นี้ จะเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงขึ้นตามคุณสมบัติของธาตุที่ถูกเติมเข้าไป ช่วงกระบวนการที่เฟสโตขึ้นนี้เรียกว่า **ช่วงการทำให้แข็ง (Age hardening)** ถูกนำมาใช้ในโลหะผสมที่ไม่ใช่เหล็ก ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง-เบริลเลียม (Copper-beryllium), ทองแดง-อลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิมบางชนิด

การแข็งตัว อย่างฉับพลัน ประกอบไปด้วยสองวัฏจักรที่แยกกันระหว่างความร้อน และความเย็น ช่วงแรก โลหะผสมถูกให้ความร้อนถึง อุณหภูมิที่**ทำการละลาย (Solutionizing Temperature)** (**อุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว**) ละลายในของแข็ง โลหะผสมยังคงอุณหภูมินี้เอาไว้ในช่วงเวลาหนึ่งก่อนที่จะทำการชุบแข็งอย่างรวดเร็ว การชุบแข็งเป็นเฟสที่สองหรือเกิดเฟสเพิ่มขึ้น เกิดการฉับพลันในโลหะผสมนั้น มันค่อนข้างให้ความแข็งแรงเหมือนกันกับโลหะ

ในช่วงที่สองของการแข็งตัวอย่างฉับพลัน โลหะผสมจะถูกให้ความร้อนซ้ำ ด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม (**ถ้าให้ดีจะต้องอยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำการละลาย**) เนื่องจากว่าเฟสที่สองเกิดขึ้น เฟสที่สองทำให้การละลายเกิดขึ้นในเกรน รวมเป็นเนื้อเดียวกันดีขึ้นจากเดิมในช่วงแรก ผลที่ได้ก็คือโครงสร้างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และมีคุณสมบัติที่จำเป็นต่อโลหะผสม

ทั้งสองช่วงที่กล่าวไว้ข้างบน เป็นการปรับสภาพทางความร้อน ของการแข็งตัวอย่างฉับพลัน เพื่อให้โลหะผสมที่ไม่ใช่เหล็ก เกิดความแข็งแรงสูงสุด และมีลักษณะตามความต้องการ เช่น เกิดความเหนียว

## การใช้วิธีแข็งตัวอย่างจับพลัน เพื่อให้โลหะผสมเกิดความแข็งแรงขึ้น

การแข็งตัวอย่างจับพลัน โดยปกติทั่วไป นิยมใช้ในกระบวนการของทองแดงผสม แต่ก็มีนำไปใช้ในโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก สำหรับในเชิงพาณิชย์ ตามตัวอย่างของการใช้ความแข็งตัวอย่างจับพลัน ตัวอย่างก็คือ C17200 คือทองแดงผสมเบริลเลียม 1.9% เพื่อใช้ในอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

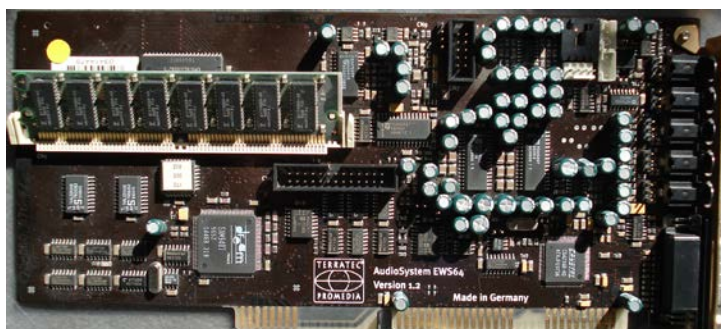


รูปตัวอย่างทองแดงผสมเบริลเลียม

ที่มา: <http://www.tronametal.com>

โลหะผสมทองแดง-เบริลเลียมที่มีความหนา 0.5 mm (0.020") และกว้าง 7.6 mm (0.3") ใช้ทำส่วนประกอบหน้าสัมผัสของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เป็นหน้าสัมผัสทองแดงผสม ทำโดย **เครื่องแสตมป์ (Stamping machine)** ทำเป็นพื้นที่ปลายการ์ดเสียบที่ช็อกเกตซ์ต่อไฟฟ้า

นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ ทองแดงที่ผสมกับเบริลเลียมก็นำมาทำเป็นลายปรี้นเหมือนกัน



รูปลายวงจรปริ้นต์ และข้อก่ดข้อต่อ

ที่มา: <http://mail.lipsia.de>

C17200 ถูกทำการอบอ่อน เพื่อให้เกิดการยืดหยุ่นตัว แต่ก็ยังคงรูปร่างได้สูง เช่นเดียวกัน เครื่องแสดมปีจึงทำงานได้ง่ายในโลหะ และถูกทำให้มีตามรูปร่างที่ต้องการโดยไม่เกิดการร้าวตัว ถึงอย่างไรความแข็งแรงของโลหะที่อ่อนเหล่านี เหมาะที่จะนำไปทำในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ จุดสัมผัสทางไฟฟ้า

วิธีการแข็งตัวอย่างฉับพลัน สามารถใช้สร้างความแข็งแรงตามต้องการหลังจากโลหะขึ้นตามรูปร่างแล้ว ในขั้นแรกของการปรับสภาพทางความร้อน ขึ้นส่วนทองแดง-เบริล เรียมถูกให้ความร้อนถึงอุณหภูมิทำลาย และรักษาระดับอุณหภูมินี้ไว้ประมาณ 30 นาที

จากนั้นก็นำไปชุบแข็งในน้ำอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดโลหะผสมที่มีความแข็งแรง และแข็งแรงกว่ารูปแบบเดิม อย่างไรก็ตาม ขึ้นส่วนก็ยังไม่แข็งแรงเต็มที่

ขึ้นส่วนที่ชุบแข็งที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ บางกรณี เกรนของโลหะจะมีความแข็งแรงอย่างช้า ๆ บางครั้งอาจใช้เวลานานมาก อย่างไรก็ตามก็ดี กระบวนการต้องเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และโลหะต้องมีความแข็งแรงสูงสุดอย่างสมบูรณ์แบบ

ความแข็งแรงสูงสุดที่ได้มา ในวิธีการชุบแข็งอย่างฉับพลัน การละลาย และขึ้นส่วนชุบแข็ง เป็นไปตามช่วงอายุ

(ซึ่งตอนจบมีความแข็งแรง) รูปแบบนี้ของลำดับที่สองปรับสภาพความร้อน ใช้ 1 - 4 ชั่วโมง หลังจากขึ้นส่วนเย็นตัว พวกมันมีความแข็งแรงสูงสุด



รูปอลูมิเนียม

ในบางครั้ง โลหะผสมที่ไม่ใช่เหล็ก เช่นอลูมิเนียม A96061 มันรักษาสภาพไว้หลังจากการยืดตัว วิธีการแข็งตัวอย่างฉับพลันซึ่งแตกต่างกับ C17200 ที่มีความแข็งแรงมาก แต่มีความยืดตัวได้เล็กน้อย

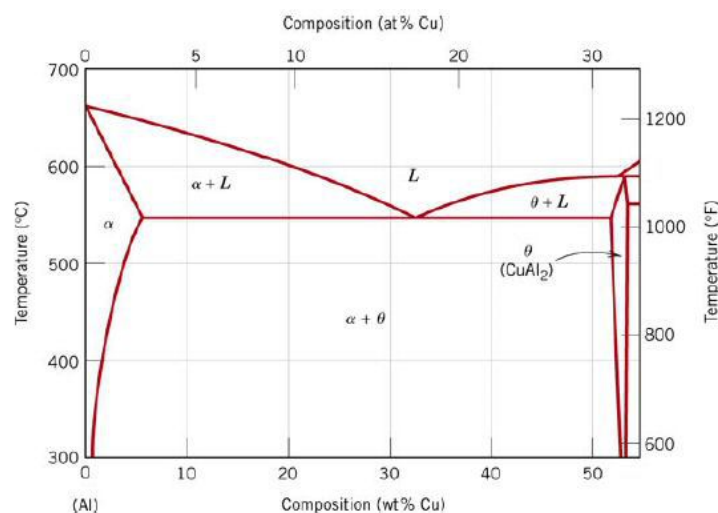
หลังจากกระบวนการ ขึ้นส่วนทองแดง – เบรลเลียม จนมีความแข็งแรงเพียงพอที่ ทำหน้าที่เป็นขั้วต่อไฟฟ้า การละลาย (การปรับสภาพความร้อนขั้นต้น) โลหะยังคงรูปแบบอย่างยอดเยี่ยม

วิธีการชุบแข็งอย่างฉับพลัน ต้องทำอย่างระมัดระวังในการควบคุมการผลิต เพื่อให้ได้ผลตามต้องการ ในระหว่างการให้ความร้อน โครงสร้างอะตอม หรือเฟสที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นในโลหะผสมที่อุณหภูมิที่หลากหลาย เฟสเหล่านี้มีผลกระทบโดยตรงในคุณสมบัติของโลหะ และสามารถแสดงออกมาที่แต่ละขั้นตอนของความร้อน และความเย็น แม้กระทั่งการใช้เฟสไดอะแกรม นักโลหะวิทยาสามารถทำนายเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างวิธีการแข็งตัวอย่างฉับพลัน เฟสไดอะแกรมจะกล่าวหัวข้อต่อไป



## 20.7 เฟสไดอะแกรม

เฟสไดอะแกรม คือการอธิบายช่วงระยะของโลหะผสมที่เกิดขึ้น ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กับเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่นำมาผสมในโลหะ เฟสไดอะแกรมทั่วไปใช้ **ระบบโลหะผสมแบบทวิ (Binary alloy systems) (โลหะผสมที่มีธาตุโลหะ)** เช่น เฟสไดอะแกรมของเหล็ก - คาร์บอน ได้อธิบาย ในบท **แผนผังเหล็กคาร์บอน** เฟสไดอะแกรมเหล็ก – คาร์บอน ตัวอย่างภาพของโครงสร้างเหล็กกล้า ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน และเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน



The maximum solubility of Cu in Al: 5.65 wt% at 548°C

Eutectic reaction:  $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + \theta(\text{CuAl}_2)$

Alloy of interest: Al-4.5wt% Cu

[รูปตัวอย่างเฟสไดอะแกรมของทองแดง-อลูมิเนียม](http://www.dierk-raabe.com)

ที่มา: <http://www.dierk-raabe.com>

เฟสไดอะแกรม เราสามารถเรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่า **ไดอะแกรมสมดุล (Equilibrium diagrams)** เพราะว่า มันได้บ่งบอกถึงโครงสร้างที่เกิดขึ้นในสภาวะสมดุล (**ส่วนประกอบที่ได้ในไดอะแกรมจะแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา และขอบเขตที่ผสม**) โครงสร้างที่แสดงส่วนประกอบ และอุณหภูมิอื่น ๆ ที่กำหนดนั้น จะเกิดขึ้นพร้อมกับมีพลังงานเคมีต่ำสุด

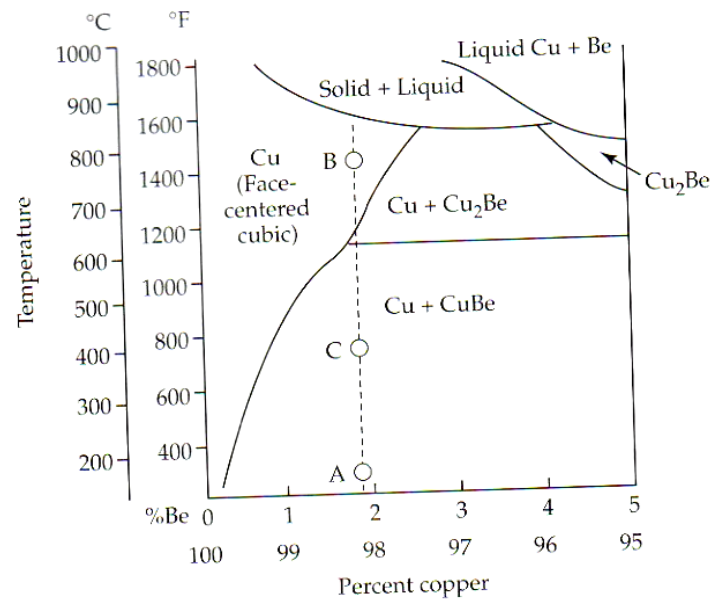
โครงสร้างที่ได้หลังจาก ผสมจะคงไว้ในช่วงเวลาหนึ่ง ที่อุณหภูมิใกล้เคียงหลอมเหลว ที่อุณหภูมิห้องความสมดุลจะเกิดขึ้นในเวลาไม่นาน โครงสร้างของโลหะส่วนมากในทางปฏิบัติจะไม่ถึงจุดสมดุล

มีอยู่มากมายที่วัสดุที่ผลิตออกมาได้มีคุณสมบัติตามต้องการในระหว่างการผลิต เมื่ออะตอมไม่ได้อยู่ที่จุดสมดุล โดยจะอ้างอิงถึงเฟสไดอะแกรม และอัตราอุณหภูมิความร้อน / ความเย็นที่มีความแตกต่างกัน

ดังนั้น นักโลหวิทยาสามารถ ทำการคำนวณการปรับสภาพทางความร้อนให้เกิดความเหมาะสม และสามารถพัฒนาคุณสมบัติที่จะเกิดขึ้นในโลหะผสม

## 20.8 อธิบายเฟสโลหะผสมในการทำโลหะให้แข็งแบบจับพลงัน

เฟสโลหะผสมที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกัน ในระหว่างการทำให้แข็งแบบจับพลงัน สามารถอธิบายถึงการใช้เฟสไดอะแกรมได้ เป็นไดอะแกรมของทองแดง – เบริลเลียม ดูในรูปภาพด้านล่าง



กราฟเฟสไดอะแกรมสำหรับทองแดง – เบริลเลียม แต่ละช่วงขอบเขตระบถึงเฟสที่แตกต่างกันของโลหะระหว่างการปรับสภาพความร้อน

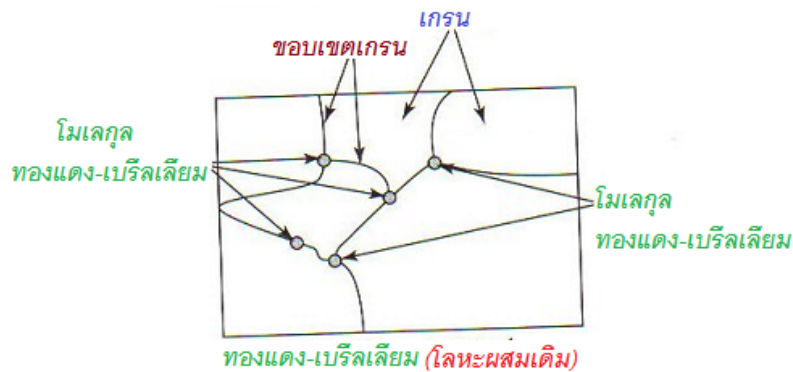


รูปทองแดง – เบริลเลียม

ที่มา: <http://www.electrical-res.com>

ตามรูปเฟสไดอะแกรมข้างบน เป็นโครงสร้างทองแดงผสม (ที่มีส่วนผสมของเบริลเลียมเล็กน้อย) ส่วนผสมของเบริลเลียมมีอยู่ประมาณ 1.9% เราเรียกโลหะทองแดงผสมรหัสนี้ว่า C17200 แสดงที่จุด A

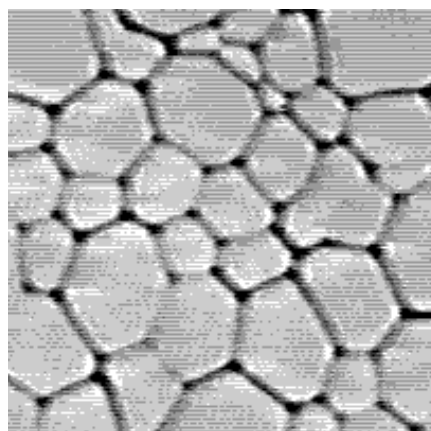
ในรูปแบบเดิมของทองแดงผสม เมื่อเทียบกับอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ของทองแดงผสมเบริลเลียม ดังแสดงในรูปสเก็ชด้านล่าง



รูปภาพสเก็ช โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างทองแดง-เบริลเลียม ก่อนที่จะทำการปรับปรุงสภาพทางความร้อน

ส่วนหนึ่งของทองแดงในโลหะผสมนี้ มีโครงสร้างเป็นแบบเอฟซีซี ส่วนในอนุภาคโครงสร้างที่เป็นผลึก มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบบีซีซี ที่อะตอมตรงกลางมักจะเป็นเบริลเลียมเสมอ อนุภาคเหล่านี้มีผลเล็กน้อยต่อความแข็งแรงของโลหะ

ในระหว่างการละลาย (ขั้นตอนแรกของการทำให้แข็งแบบดับพลง) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จากจุด A ไปถึงอุณหภูมิที่จุด B อนุภาคของ CuBe ละลายในสารละลาย ดังจะเห็นในรูปด้านล่าง



รูปตัวอย่างอนุภาคของเบริลเลียมละลายในสารละลายเมื่อโลหะผสมไปถึงอุณหภูมิการละลาย

ที่มา: <http://www.weizmann.ac.il>

เมื่อโลหะผสมถูกชุบแข็งอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิห้อง (ที่จุด A ในรูปผังไดอะแกรมด้านบน) อัตราความเย็นจะเป็นตัวขัดขวางการพัฒนาในเฟสที่สอง อนุภาคเบรลเลียมมีเวลาที่ไม่เพียงพอที่จะเป็นแบบจับพลัน

ที่จุดนี้เบรลเลียมยังคงอยู่ในการละลาย เฟสเดียวที่ผสมเป็นสารละลายจะทำให้เกิดการอิ่มตัวสูงกว่า เรียกว่า **การละลายจุดอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solution)** โลหะผสมที่แข็งแกร่งกว่าเป็นผลของการที่ถูกชุบแข็ง

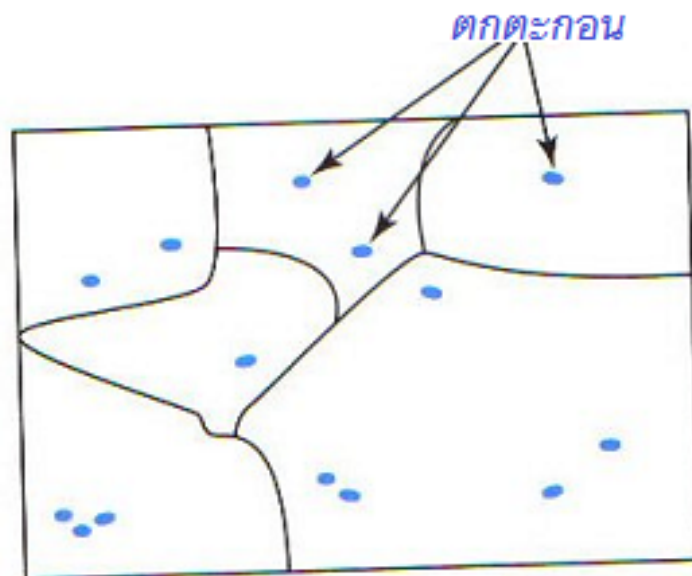
ทุก ๆ อนุภาคของ CuBe สามารถมองดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ที่มีอัตราขยาย 20,000 เท่า จากโครงสร้างที่มีเบรลเลียมจะมีสภาพแข็งแกร่งขึ้น รูปแบบโลหะผสม CuBe ขนาดของอนุภาคจะเกือบเท่ากับขนาดของอะตอมเดิม

การปรับสภาพทางความร้อนในลำดับที่สอง โลหะผสมที่ถูกให้ความร้อนซ้ำ จะเกิดความแข็งแกร่งเพิ่มขึ้นมา โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง (ที่จุด C ในรูปผังไดอะแกรมด้านบน) ในการละลายนั้นเบรลเลียมจะเกิดปฏิกิริยากับทองแดงในอนุภาค CuBe แบบจับพลัน การผสมจะเกิดขึ้นตามความเป็นจริงที่ผลิตออกมา และเมื่อถึงจุดหนึ่ง มันจะไม่เกิดการละลายไปมากกว่านี้

ณ อุณหภูมิปานกลาง อะตอมของเบรลเลียมสามารถเคลื่อนไปในโลหะได้ แต่พวกมันจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกล หรือเร็วมากนัก อะตอมเหล่านี้มีแนวโน้มการเคลื่อนที่เกือบจะเหมือนอนุภาคในรูปแบบแรก มันเป็นการเคลื่อนที่แบบมีข้อจำกัด

อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะเกิดเป็นรูปแบบ และแผ่ขยายออกไปเท่ากัน ในเกรนของโลหะผสม ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างที่เป็นรูปแบบดั้งเดิม ดูที่รูปด้านล่าง





ทองแดง-เบริลเลียม  
(หลังจากผ่านการแข็งตัวอย่างฉับพลัน)

รูปภาพสเก็ช โครงสร้างจุลภาคของทองแดงเบริลเลียมแสดงการพัฒนาอย่างรวดเร็วในโลหะผสมหลังจากผ่านการชุบแข็งอย่างฉับพลัน

จากรูปแบบโครงสร้าง เป็นเหตุให้โลหะจะมีแข็งแรงแรงมากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนหน้านี้

โครงสร้างที่ตกตะกอน พวกมันจะไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องมองด้วยกล้องจุลทรรศน์ (อัตราขยาย 50 – 2000 เท่า) อัตราขยายของกล้องยิ่งมากเท่าไรก็สามารถเห็นได้ชัดมากขึ้น

กระบวนการทองแดง-เบริลเลียม เนื่องจากผ่านกระบวนการทำให้แข็งแบบฉับพลัน มันจะไม่สูญเสียความยืดหยุ่นมากนัก แต่มันจะสูญเสียเมื่อนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นหรือวิธีการสร้างความแข็งแกร่งอื่น ๆ

ผลที่ได้จากการทำให้แข็งแบบฉับพลัน ที่ให้เกิดความแข็งแกร่งสูงสุดในโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ที่มีการสูญเสียในด้านการยืดตัวลดลง

## การเปรียบเทียบของวิธีการทำให้แข็งตัว แสดงได้ในตารางด้านล่าง

| กระบวนการ                    | อุปกรณ์ที่ใช้<br>(หลังจากการหล่อ) | ความแข็งแรง (เทียบกับ<br>โลหะบริสุทธิ์ที่ความ<br>แข็งแรงต่ำ) | การยึดตัว (เทียบกับ<br>โลหะบริสุทธิ์ที่ยึดตัวสูง) |
|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| การผสม                       | ไม่มี                             | ปานกลาง                                                      | ค่อนข้างสูง                                       |
| งานขึ้นรูปเย็น               | รีด, ตี, ดึง, กระแทก<br>ขึ้นรูป   | สูง                                                          | ต่ำ                                               |
| การทำให้แข็งอย่าง<br>ฉับพลัน | เตาเผา, ถังชุบแข็ง                | สูงมาก                                                       | ปานกลาง                                           |

จบบทที่ 20